

Rec'd PCT/PTO 20 JUN 2005

10/539818

785.45159X00

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): Gerhard HUBSHCEN et al.

Serial No.: Not Yet Assigned

Filed: June 20, 2005

For: ELECTROMAGNETIC ULTRASONIC TRANSDUCER

CLAIM FOR PRIORITY

Commissioner of Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

June 20, 2005

Sir:

Under the provisions of 35 U.S.C. 119 and 37 CFR 1.55, the applicant(s)
hereby claim(s) the right of priority based on:

German Application 102 59 891.6 filed December 20, 2002

Respectfully submitted,



Donald E. Stout
Registration No. 26,422
ANTONELLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP

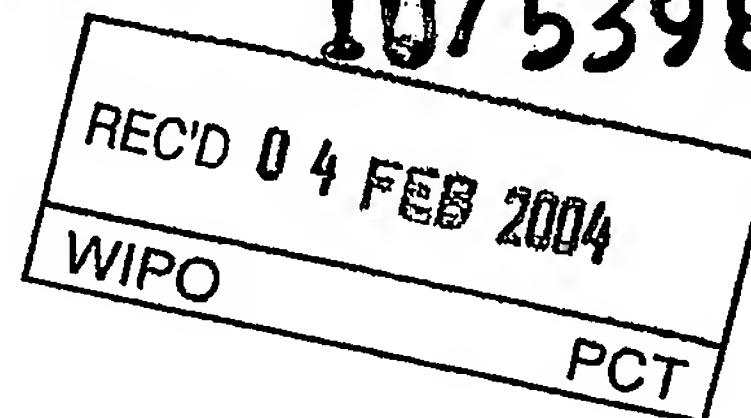
DES/dc
(703) 312-6600

BEST AVAILABLE COPY



EP/03/13857
Rec'd PCT/PTO 20 JUN 2005

10/539818



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 59 891.6

Anmeldetag: 20. Dezember 2002

Anmelder/Inhaber: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung eV,
München/DE

Bezeichnung: Elektromagnetischer Ultraschallwandler

IPC: G 01 N, G 01 B, H 04 R

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 09. Januar 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Holte

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Rösler

Patentanwaltskanzlei

urpatent®

Rösler Patentanwaltskanzlei, Landsberger Str. 480 a, 81241 München

Deutsches Patent- und Markenamt

Zweibrückenstr. 12

80297 München

Uwe Th. Rösler, Dipl.-Phys.
Dr. Roland Gagel, Dipl.-Phys.*

Patentanwälte,
European Patent Attorneys,
European Trademark Attorneys

Telefon: +49/(0)89/820 477 120

Telefax: +49/(0)89/820 477 121

email: ur@urpatent.com

19.12.2002, Rö/He
Unser Zeichen: F102R223

Neue Deutsche Patentanmeldung

Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.,
Leonrodstr. 54, 80636 München

Elektromagnetischer Ultraschallwandler

Technisches Gebiet

Die Erfindung bezieht sich auf einen elektromagnetischen Ultraschallwandler zur koppelmittelfreien Erzeugung und/oder zum Empfang von Ultraschallwellen in Form linear polarisierter Transversalwellen in ein bzw. aus einem Werkstück mit wenigstens einer die Ultraschallwellen innerhalb des Werkstückes wandelnden Einheit, die eine Spulenordnung zur Erzeugung bzw. zum Nachweis eines HF-Magnetfeldes sowie eine Vormagnetisierungseinheit zur Erzeugung eines quasistatischen Magnetfeldes aufweist, das das HF-Magnetfeld im Werkstück überlagert, wobei die Spulenordnung torusförmig auf wenigstens einem

teilingartig oder U-förmig ausgebildeten Magnetkern angeordnet ist, der jeweils zwei dem Werkstück zukehrbare Stirnflächen aufweist.

Derartige Ultraschall-Prüfköpfe ermöglichen die Erzeugung sowie den Empfang von linear polarisierten Transversalwellen, die vorzugsweise senkrecht unter dem Prüfkopf in das Werkstück eingeschallt bzw. aus dieser Richtung empfangen werden und vorzugsweise senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen. Technische Anwendungsgebiete derartiger Ultraschall-Prüfköpfe sind bspw. die zerstörungsfreie Prüfung elektrisch leitfähiger Werkstücke auf Materialfehler, wie bspw. Risse, insbesondere ^{parallel} senkrecht zur Polarisationsrichtung der Ultraschallwelle und ^{senkrecht} parallel zur Ausbreitungsrichtung orientierte rissartige Fehler, sowie andere auf Ultraschallgeschwindigkeit und Polarisierung basierende Verfahren, wie bspw. die Spannungsmessung oder insbesondere die Dickenmessung.

Stand der Technik

Die aus dem Stand der Technik bekannten koppelmittelfreien elektromagnetischen Prüfköpfe wandeln elektromagnetische Feldenergien in elastische Energie einer Ultraschallwelle und umgekehrt. Der Wandlungsmechanismus beruht hierbei auf den Wechselwirkungen zwischen dem elektromagnetischen Feld und einem elektrisch leitendem Material, das zudem durch ein von außen angelegtes statisches oder quasi statisches Magnetfeld durchsetzt wird. Der Begriff „quasi statisches“ Magnetfeld umfasst neben einem tatsächlich statischen Magnetfeld, das bspw. mittels Permanentmagnete erzeugbar ist, auch niederfrequente Magnetfelder, deren Wechselfrequenz sehr viel kleiner ist als die Hochfrequenz, mit der die Spulenanordnung zur Erzeugung von Hochfrequenzfeldern betrieben wird.

Zur Anregung von Ultraschallwellen innerhalb eines elektrisch leitenden Werkstückes wird zumindest ein Teil des von der HF-Spulenanordnung erzeugten hochfrequenten Magnetfeldes, dessen Frequenzbereich innerhalb des Ultraschall-Frequenzbereiches liegt, in das Werkstück eingekoppelt. Diese rufen innerhalb der sogenannten Skintiefe Wirbelströme hervor, die in Überlagerung mit dem „quasi statischen“

Magnetfeld aufgrund von auftretenden Lorentz-Kräften oder Magnetostruktionen innerhalb des Werkstückes Ultraschallwellen erzeugen.

Der Nachweis von innerhalb des Werkstückes auftretenden Ultraschallwellen erfolgt in umgekehrter Weise über die Detektion der induzierten elektrischen Spannung innerhalb der Spulenanordnung, die durch HF-Felder bewirkt wird, die wiederum durch Ultraschallwellen bedingte Bewegungen elektrischer Ladungen im Werkstück innerhalb des „quasi statischen“ Magnetfeldes hervor gerufen werden.

Allen bekannten elektromagnetischen Ultraschallwandlern liegt das gemeinsame Entwicklungsziel zugrunde, die Messempfindlichkeit und damit verbunden die mit der Spulenanordnungen erzeugbaren Signalamplituden sowohl im Sende- als auch im Empfangssignal zu optimieren. Hierbei gilt es zum einen, den Koppelmechanismus, mit dem die erzeugten und nachzuweisenden HF-Felder zwischen dem Ultraschallwandler und dem Werkstück ein- und ausgekoppelt werden, möglichst verlustfrei zu gestalten und zum anderen die Feldstärke des quasistatischen Magnetfeldes, die für die Erzeugung und für den Nachweis von Ultraschallwellen massgeblich ist, möglichst groß zu wählen.

Aus der DE 42 23 470 C2 geht ein gattungsgemäßer elektromagnetischer Prüfkopf für die Senkrechteinschallung von linear polarisierten Transversalwellen hervor, bei dem die HF-Magnetfelder zwischen dem Prüfkopf und dem Werkstück auf höchst effiziente Weise ein- bzw. ausgekoppelt werden, ohne dabei, wie es bei einer Vielzahl anderer Prüfköpfen der Fall ist, die zumeist als HF-Luftspulen ausgebildeten Sende- und Empfangsspulen unmittelbar auf der Werkstückoberfläche aufliegend anzuordnen. Vielmehr sieht der in der vorstehenden Druckschrift beschriebene elektromagnetische Prüfkopf gemäß Figur 2 einen halb offen ausgebildeten, kommerziell aus amorphen Bandmaterial gefertigten Ringbandkern 1 vor, der jeweils von einer Sende- 41 sowie von einer Empfangsspule 42 umwickelt ist. Die Stirnflächen 2 des halb offen ausgebildeten Ringbandkerns 1 dienen als Koppelflächen für die HF-Magnetfelder und sind in geeigneter Weise auf die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstückes 7 auflegbar. Die durch die HF-

Sendespulenordnung 41 erzeugten HF-Magnetfelder gelangen über die Stirnflächen 2 des Ringbandkerns 1 in das Werkstück 7 und vermögen oberflächennahe Wirbelströme 8 innerhalb der Skintiefe des Werkstückes 7 zu induzieren.

Das zur Schallwandlung notwendige senkrecht zur Oberfläche des Werkstückes 7 orientierte quasistatische Magnetfeld wird mittels zweier gleichnamiger Permanentmagnete 6 erzeugt zur Materialoberfläche des Werkstückes 7 geführt. Hierbei befindet sich die für die Ausbildung des senkrecht zur Werkstückoberfläche orientierten „quasistatischen“ Magnetfeldes erforderliche Vormagnetisierungseinheit innerhalb des offenen Teils des Ringbandkerns 1. Mit dieser Anordnung bilden sich innerhalb des Werkstückes Ultraschallwellen mit einer Ausbreitungsrichtung A senkrecht zur Werkstückoberfläche und einer dazu senkrechten Schwingungsebene S aus.

Darstellung der Erfindung

Ausgehend von dem vorstehend genannten Stand der Technik liegt die Aufgabe zugrunde, einen gattungsgemäßen elektromagnetischen Ultraschallwandler derart auszubilden, dass die Effizienz, mit der Ultraschallwellen erzeugt werden sowie deren Nachweisempfindlichkeit gegenüber den bisher bekannten Ultraschallwandlern entscheidend gesteigert werden soll. Insbesondere gilt es darauf zu achten, die Spulenordnung von der Werkstückoberfläche beabstandet anzuordnen, um mechanische Beeinträchtigungen der Spulenordnung ausschließen zu können. Auch soll mit dem weitergebildeten Ultraschallwandler die Erzeugung von horizontal polarisierten Ultraschallwellen möglich sein.

Erfindungsgemäß ist ein elektromagnetischer Ultraschallwandler zur koppelmittelfreien Erzeugung und/oder zum Empfang von Ultraschallwellen in Form linearpolarisierter Transversalwellen in ein bzw. aus einem Werkstück mit wenigstens einer die Ultraschallwellen innerhalb des Werkstückes wandelnden Einheit, die eine Spulenordnung zur Erzeugung bzw. zum Nachweis eines HF-Magnetfeldes sowie eine Vormagnetisierungseinheit zur Erzeugung eines quasi statischen Magnetfeldes

aufweist, das das HF-Magnetfeld im Werkstück überlagert, wobei die Spulenanordnung torusförmig auf wenigstens einem teilringartig oder U-förmig ausgebildeten Magnetkern angeordnet ist, der jeweils zwei dem Werkstück zukehrbare Stirnflächen aufweist, derart weitergebildet, dass die dem Werkstück zukehrbaren Stirnflächen des Magnetkerns mittel- oder unmittelbar mit einem die Stirnflächen miteinander verbindenden magnetischen Flussleitstück verbunden sind, das eine dem Werkstück zugewandte Oberfläche aufweist.

Durch Vorsehen eines derartigen Flussleitstückes, das die Stirnflächen eines vorzugsweise als Ringbandkern ausgebildeten Magnetkerns miteinander verbindet, ist es insbesondere möglich, die durch die Spulenanordnung generierten HF-Magnetfelder höchsteffizient in das Werkstück einzukoppeln, um auf diese Weise stark ausgeprägte Wirbelströme innerhalb der Skintiefe generieren zu können. Hierbei weist das Flussleitstück eine vorzugsweise konform an die Werkstückoberfläche ausgebildete Oberfläche auf, so dass eine vorzugsweise konturgetreue Kontaktierung zwischen dem Flussleitstück und dem Werkstück ermöglicht wird. In einer bevorzugten Ausführungsform ist das Flussleitstück als ein rechteckiger Stab mit einer ebenen, dem Werkstück zugewandten Oberfläche ausgebildet, die bündig auf einer ebenso eben ausgebildeten Werkstückoberfläche koppelmittelfrei aufsetzbar ist. Selbstverständlich kann die dem Werkstück zugewandte Oberfläche des Flussleitstückes je nach Krümmungsverhalten des zu untersuchenden Werkstückes in einer an die Werkstückkontur angepassten Oberflächenform gefertigt werden. Soll der elektromagnetische Ultraschallwandler bspw. bevorzugt zur Untersuchung zylinderförmiger Werkstückoberflächen eingesetzt werden, so ist das die Stirnflächen des Ringbandkernes verbindende Flussleitstück in entsprechender Konturbeschaffenheit auszubilden.

Neben der optimierten Einkopplung der HF-Magnetfelder in die Werkstückoberfläche über das Flussleitstück vermag dieses ebenso das quasi statische Magnetfeld nahezu verlustfrei in das Werkstück einzukoppeln. Hierzu ist in einer typischen Ausführungsform die Vormagnetisierungseinheit zur Erzeugung des quasi statischen Magnetfeldes in Form eines Permanentmagneten ausgebildet, der unmittelbar auf

dem Flussleitstück, jeweils zwischen den Stirnflächen des Ringbandkernes, der den Permanentmagneten überragt, angeordnet. Hierbei dient das Flussleitstück als eine Art Konzentrador für das quasi statische respektive permanente Magnetfeld.

Um die Ausbildung von Wirbelströmen innerhalb des Flussleitstückes zu vermeiden, bietet es sich an, das Flussleitstück aus einem elektrisch nicht leitfähigen Trägermaterial auszubilden, in dem matrixartig weichmagnetische Partikel eingebracht sind. Alternativ vermag auch eine stapelförmige Anordnung aus weichmagnetischen Transformatorblechen die Ausbildung von Wirbelströmen innerhalb des Flussleitstückes wirksam zu vermeiden.

Neben der vorstehend beschriebenen erfindungsgemäßen Ausbildung eines elektromagnetischen Ultraschallwandlers, dessen teilringartig oder U-förmig ausgebildeter Magnetkern ein einzelnes magnetisches Flussleitstück überragt, wobei die Stirnflächen des Magnetkerns mit dem einzigen Flussleitstück innig verbunden sind, sieht ein zweites, alternatives erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel für einen elektromagnetischen Ultraschallwandler wenigstens zwei parallel nebeneinander angeordnete Flussleitstücke vor, die brückenartig von wenigstens zwei teilringartig oder U-förmig ausgebildeten Magnetkernen über ihre jeweiligen Stirnflächen verbunden sind. Die Magnetkerne befinden sich voneinander beabstandet an den sich gegenüberliegenden Endbereichen der stabförmig ausgebildeten Flussleitstücke. Diese Bauweise erlaubt es die vorzugsweise als Permanentmagnetanordnung ausgebildete Vormagnetisierungseinheit zwischen beiden Magnetkernen längs beider Flussleitstücke anzubringen ohne jeweils von den vorzugsweise als Ringbandkernen ausgebildeten Magnetkernen überspannt zu werden, wie es beim vorstehend geschilderten Ausführungsbeispiel der Fall ist. Dies führt letztlich dazu, dass eine nahezu unbeschränkte Größenskalierung der Permanentmagnetanordnung möglich wird, wodurch die Magnetfeldstärke entsprechend vergrößerbar ist.

Neben der einfachsten Ausbildungsform des mit wenigstens einer Spulenanordnung umwickelten Magnetkerns in Form eines Ringbandkernes sind auch Magnetkerne mit

einem M-förmigen Magnetkernquerschnitt denkbar, mit jeweils drei frei endenden Stirnflächen. Mit derartigen Magnetkernen lassen sich vergleichbar zur vorstehenden elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung jeweils drei parallel nebeneinanderliegende magnetische Flussleitstücke brückenartig miteinander verbinden.

Wie im weiteren unter Bezugnahme auf die nachstehenden Ausführungsbeispiele im einzelnen ausgeführt wird, ist es möglich, bei geeigneter Zusammenstellung mehrerer der vorstehend beschriebenen Ultraschallwandler sowie Ansteuerung der jeweils auf den Magnetkernen torusförmig aufgebrachten Spulenanordnungen, linearpolarisierte Transversalwellen innerhalb des Werkstückes zu generieren. Insbesondere ermöglichen entsprechende Mehrfachanordnungen aus den erfindungsgemäß ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandlern die Erzeugung von vertikal oder horizontal polarisierten linearer Transversalwellen.



Hierzu lassen sich die eingangs beschriebenen, erfindungsgemäß ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandler in Vielfachanordnung nebeneinander plazieren, um einerseits eine möglichst große Sende- sowie Empfangsapertur sowie um andererseits durch phasengesteuerte HF-Anregung der einzelnen Spulenanordnungen eine gezielt einstellbare Abstrahlcharakteristik für die in das Werkstück einkoppelbaren Ultraschallwellen zu erhalten. Wie im weiteren noch ausgeführt wird, eignen sich derartige Anordnungen für eine Phased-Array-Anordnung zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen (SH-Wellen), deren Ausbreitungsrichtung gezielt einstellbar ist, die bezogen zur Normalen der Werkstückoberfläche einen variablen Winkel zwischen 0° und 90° einschließt.

Kurze Beschreibung der Erfindung

Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung exemplarisch beschrieben. Es zeigen:

- Fig. 1 elektromagnetischer Ultraschallwandler mit einem einzigen Flussleitstück,
- Fig. 2 elektromagnetischer Ultraschallwandler nach dem Stand der Technik,
- Fig. 3 Anordnung aus einer Vielzahl einzelner elektromagnetischer Ultraschallwandler nach Ausführung gemäß Figur 1,
- Fig. 4 schematisierte Darstellung des durch die Anordnung gemäß Figur 3 erzeugten Ultraschallwellenfeldes innerhalb eines Werkstückes,
- Fig. 5 elektromagnetischer Ultraschallwandler mit zwei Flussleitstücken, die brückenartig von jeweils zwei halbringförmigen Magnetkernen überspannt sind,
- Fig. 6 Anordnung einer Vielzahl elektromagnetischer Ultraschallwandler gemäß Figur 5 sowie
- Fig. 7 im Querschnitt M-förmig ausgebildete Magnetkerne, die jeweils brückenartig drei magnetische Flussleitstücke überspannen.

Wege zur Ausführung der Erfindung, gewerbliche Verwendbarkeit

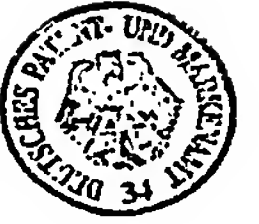
In Figur 1 ist die einfachste Ausführungsform eines erfindungsgemäß ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandlers dargestellt, der als teilringartig ausgebildeter Magnetkern einen halbierten Ringbandkern 1 aufweist, dessen zwei Stirnflächen 2 unmittelbar mit einem im Querschnitt rechteckförmig ausgebildeten, stabförmigen Flussleitstück 3 verbunden ist. Um den halbierten Ringbandkern 1 ist torusförmig eine Spulenanordnung 4 gewickelt, die über zwei Anschlusskontakte 5 verfügt. Unmittelbar auf der Oberfläche 31 des Flussleitstückes 3 ist eine Vormagnetisierungseinheit 6 vorgesehen, die im gezeigten Ausführungsbeispiel als Permanentmagnet ausgebildet ist und stilisiert über eine Nordpolung verfügt. Hierbei überragt der Ringbandkern 1 den Permanentmagneten 6 vollständig. Ebenfalls stilisiert dargestellt ist das mit Hilfe der elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung zu untersuchende Werkstück 7, auf dessen Oberfläche 71 das Flussleitstück 3 mit seiner der dem Werkstück 7 zugewandten Oberfläche 32 vorzugsweise konturgetreu auflegbar ist. Somit tritt das durch den Permanentmagnet

6 erzeugte Magnetfeld senkrecht durch das Flussleitstück 3 über die Werkstückoberfläche 71 in das Werkstück 7 ein. Alternativ zur Ausbildung der Vormagnetisierungseinheit in Form eines Permanentmagneten 6, wie in Figur 1 dargestellt, ist es ebenso denkbar, die Vormagnetisierungseinheit in Form eines Elektromagneten auszubilden, dessen Feldlinien in gleicher Weise wie in der in Figur 1 dargestellten Anordnung senkrecht zur Werkstückoberfläche in das Werkstück eintreffen. Ebenso ist es jedoch auch möglich, einen Elektromagneten derart zu positionieren, so dass das durch den Elektromagneten hervorgerufene Magnetfeld parallel zur Werkstückoberfläche in das Werkstück eintritt. Auf die mit einer derartigen Magnetfeldausrichtung verbundenen Auswirkungen wird im weiteren eingegangen.

Der in Figur 1 dargestellte elektromagnetische Ultraschallwandler ist als elektromagnetischer Linienwandler anzusehen, der sowohl als Ultraschallsender sowie auch als Ultraschallempfänger betreibbar ist. Im Sendefall sind die Anschlusskontakte 5 mit einem HF-Generator verbunden, im Empfangsfall hingegen mit einem entsprechenden Verstärker und einer nachgeschalteten Auswerteeinheit. Selbstverständlich ist es möglich, längs eines einzigen halbierten Ringbandkernes zwei getrennte Spulenanordnungen vorzusehen, von denen eine als Sende- und die andere als Empfangsspule dient.

Aufgrund des großflächigen Kontaktes zwischen der Oberseite 32 des Flussleitstückes 3 und der Werkstückoberfläche 71 des Werkstückes 7 koppeln die längs des Flussleitstückes 3 geführten HF-Magnetfelder längs der gesamten Erstreckung des Flussleitstückes 3 in das Werkstück 7 ein und rufen innerhalb der Skintiefe intensive Wirbelströme hervor. Diese wiederum treten in Wechselwirkung mit dem die Werkstückoberfläche 71 durchdringenden quasi stationären Magnetfeld und erzeugen aufgrund sich ausbildender Lorentzkräfte sowie Magnetostriktionen Ultraschallwellen mit einer Frequenz, die der Wechselfrequenz der HF-Magnetfelder entsprechen. Durch den innigen Kontakt zwischen dem Flussleitstück 3 und der Werkstückoberfläche 71 wird ein höherer magnetischer Fluss innerhalb des Werkstückes 7 hervorgerufen, als es mit den bisher bekannten elektromagnetischen

Ultraschallwandlern, bspw. dargestellt in Figur 2, der Fall ist. Auf diese Weise lässt sich die Effektivität sowohl in der Erzeugung von Ultraschallwellen als auch die Sensitivität im Empfangsfalle erheblich steigern.



Mit dem in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiel eines elektromagnetischen Ultraschallwandlers, bei dem das quasi statische Magnetfeld senkrecht die Werkstückoberfläche 71 durchdringt, lassen sich linear polarisierte Transversalwellen erzeugen, deren Ausbreitungsrichtung senkrecht zur Werkstückoberfläche orientiert ist und die eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientierte Schwingungsebene aufweisen.

Zur gezielten Anregung sog. horizontal polarisierter Transversalwellen (SH-Wellen) wird in an sich bekannter Weise eine Vormagnetisierungseinheit benötigt, meist in Form einer Anordnung von Permanentmagneten mit alternierender Polarität, deren alternierende Magnetfelder in Überlagerung mit einem HF-Magnetfeld innerhalb des Werkstückes gebracht werden. Eine erfindungsgemäß ausgebildete Anordnung zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen ist in Figur 3 dargestellt, die in dem gezeigten Ausführungsbeispiel fünf parallel nebeneinander angeordnete elektromagnetische Linienwandler gemäß dem in Figur 1 dargestellten Beispiel aufweisen. Es sei angenommen, dass die in Figur 3 stilisiert angedeuteten Spulenanordnungen 4 auf jeder der einzeln dargestellten Ultraschallwandler sowohl für die Erzeugung als auch für den Empfang von Ultraschallwellen ausgelegt sind.

Sind die elektrischen Anschlüsse 5 der einzelnen Spulenanordnungen 4 für den Sende- und Empfangsfall an getrennten Elektronikkanälen eines HF-Generators bzw. entsprechenden Verstärkers mit Auswerteeinheit verbunden und werden die einzelnen Elektronikkanäle jeweils in ihrer Ansteuerphase zeitverzögert betrieben, so lässt sich mit der in Figur 3 dargestellten Anordnung eine Phased-Array-Anordnung realisieren, die in Art eines Gruppenstrahlers horizontal polarisierte Transversalwellen innerhalb eines Werkstückes zu erzeugen sowie nachzuweisen vermag. Hierbei werden jeweils benachbart angeordnete Ultraschallwandler mit einem jeweils entgegengesetzt im Flussleitstück gerichteten magnetischen Fluss betrieben, wodurch eine alternierende Ausbildung von Wirbelstromrichtungen

unterhalb jeweils benachbarter Flussleitstücke generiert werden, die zu jeweils entgegengesetzt gerichteten Lorentzkräften und damit verbundenen Magnetostruktionsrichtungen führen und auf diese Weise Scherkräfte zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen innerhalb des Werkstückes hervorrufen.

Durch geeignete Wahl der phasenabhängigen Ansteuerung der einzelnen, in nebeneinander in Reihe angeordneten Ultraschallwandlern lässt sich die Richtcharakteristik der sich innerhalb des Werkstückes ausbildenden horizontal polarisierten Transversalwelle derart gezielt einstellen, so dass die Hauptausbreitungsrichtung der Hauptkeule der horizontal polarisierten Transversalwelle einen Winkel α zur Oberflächennormale der Werkstückoberfläche einschließt, der zwischen 0° und 90° beliebig wählbar ist. In Figur 4 ist hierzu eine veranschaulichende Skizze zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen mit Hilfe der in Figur 3 dargestellten Ultraschallwellenanordnung dargestellt. Es sei angenommen, dass vier Ultraschallwandler $S_1 - S_4$ nebeneinander mit einem gegenseitigen Abstand D auf der Werkstückoberfläche 71 angeordnet sind. Die einzelnen Ultraschallwandler $S_1 - S_4$ werden mit jeweils einem zeitlichen Abstand Δt mit einem Strompuls in der vorstehen beschriebenen Weise beaufschlagt. Aufgrund der phasenverzögerten Bestromung der vier Ultraschallwandler $S_1 - S_4$ bilden sich innerhalb des Werkstückes 7 horizontal polarisierte Transversalwellen aus, die eine Hauptausbreitungsrichtung aufweisen, die mit der Normalen zur Werkstückoberfläche einen Winkel α einschließen, für den gilt:

$$\alpha = \sin \frac{c_t \cdot \Delta t}{D}$$

In obiger Beziehung bedeutet c_t die im Werkstück für die horizontal polarisierte Transversalwelle geltende Ausbreitungsgeschwindigkeit. Somit zeigt sich, dass bei einer phasensynchronen Ansteuerung aller vier Ultraschallwandler, d. h. $\Delta t = 0$, α gleich Null wird, so dass die horizontal polarisierten Transversalwellen senkrecht zur Werkstückoberfläche in das Werkstück abgestrahlt werden. Werden die einzelnen

Ultraschallwandler mit einer Phasenzeitverzögerung Δt betrieben, während der eine Ultraschallwelle bspw. vom Ultraschallwandler S1 zum Wandler S2 gelangt, also die Wegstrecke D zurücklegt, so schließt die Hauptkeule der sich innerhalb des Werkstückes ausbildenden horizontal polarisierten Transversalwelle mit der Normalen zur Werkstückoberfläche einen Winkel α von 90° ein. Je nach Wahl von Δt lässt sich somit die Hauptkeule beliebig 0° und 90° innerhalb des Werkstückes schwenken.

Die vorstehenden Ausführungen, die sich auf den Sendebetrieb beziehen, lassen sich in umgekehrter Weise ebenso auch für den Empfang von SH-Wellen aus einem Werkstück übertragen.

Eine weitere Ausführungsform für einen erfindungsgemäß ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandler ist in Figur 5 dargestellt. Der Wandler weist zwei parallel beabstandet angeordnete magnetische Flussleitstücke 3, 3' auf, deren Oberseiten 32, 32' mit den Stirnseiten zweier halbkreisförmig ausgebildeter Ringbandkerne 1, 1' verbunden sind. Beide Flussleitstücke 3, 3' sind somit durch die Ringbandkerne 1, 1' brückenartig miteinander verbunden. Überdies weist das in Figur 5 dargestellte Ausführungsbeispiel zwei gegenpolige Permanentmagnete 6, 6' auf, die auf den jeweiligen Flussleitstücken 3, 3' aufsitzen. Die Ansteuerung der Spulenanordnungen der einzelnen Ringbandkerne 1, 1' erfolgt derart, dass in den Flussleitstücken 3, 3' gegensätzlich gerichtete dynamische Magnetfelder entstehen, die zu Wirbelströmen im Werkstück führen, die senkrecht zur Längsausdehnung der Flussleitstücke 3, 3' und ebenfalls zueinander entgegengesetzt orientiert sind. Aufgrund der ungleichpoligen Permanentmagnete 6, 6' bilden sich unter den Flussleitstücken innerhalb der Skintiefe des Werkstückes gleichgerichtete Scherkräfte aus, wodurch linear polarisierte Transversalwellen mit senkrecht zur Werkstückoberfläche ausbreitende Ultraschallwellen entstehen. Die in Figur 5 dargestellte Anordnung ist somit als Normalprüfkopf anzusehen, für die Erzeugung und Nachweis linear polarisierter Transversalwellen mit großer Apertur, vergleichbar jener, die nur einen einzigen elektromagnetischen Linienwandler aufweist nach Bauart des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiels.

In Figur 6 ist eine Anordnung aus drei nebeneinander angeordneten Normalprüfköpfen dargestellt, gemäß dem Grundaufbau des in Figur 5 gezeigten Ultraschallwandlers. Die drei nebeneinander angeordneten Normalprüfköpfe N sind mit ihren zugehörigen HF-Spulen 4 derart geschaltet, dass jeweils in benachbarten Flussleitstücken 3 die Richtung der dynamischen Magnetfelder entgegengesetzt orientiert sind, d. h. es besteht eine Phasendifferenz von 180° zwischen jeweils unmittelbar benachbarten HF-Magnetfeldern. Durch einen derart orientierten, jeweils entgegengesetzt gerichteten magnetischen Fluss der dynamischen Magnetfelder werden im Sendefall in der Werkstückoberfläche Wirbelströme eingekoppelt, die senkrecht zur Richtung der dynamischen Magnetfelder orientiert sind. Bei Überlagerung eines einheitlichen statischen Magnetfeldes führen die Wirbelströme j unmittelbar unterhalb der jeweiligen Flussleitstücke 3 zu Lorentzkraften F_L , die jeweils unmittelbar unterhalb benachbarter Flussleitstücke entgegengesetzt gerichtet sind und somit Scherkräfte innerhalb des Werkstückes hervorrufen, durch die SH-Transversalwellen erzeugt werden. Die Spulwellenlänge, die der halben Schwingungswellenlänge der SH-Welle entspricht, ist durch den gegenseitigen Abstand unmittelbar benachbarter Flussleitstücke bestimmt. Die Abstrahlrichtung der SH-Wellen ist mit der in Figur 6 dargestellten Anordnung senkrecht zu den einzelnen Flussleitstücken 3 orientiert, die auch durch die jeweils entgegengesetzt gerichteten Pfeile A gemäß Figur 6 angedeutet ist.

Die in Figur 6 dargestellte Anordnung besteht auch insbesondere in der gezielten Verwendung eines großflächigen unipolaren Magneten 6, der entscheidend das störende Barkhausen-Rauschen im Bereich der einzelnen Wandlerelemente zu unterdrücken vermag.

In Figur 7 ist eine der Anordnung gemäß Figur 6 sehr ähnliche Anordnung zur Erzeugung von SH-Wellen dargestellt. Im Unterschied zur Figur 6 sind die in Figur 7 eingesetzten Ringbandkernsegmente 1 in Form m-förmiger Spulenkerne ausgebildet, wobei jeweils zwei m-förmige Spulenkerne mit jeweils 3 Flussleitstücken 3, 3', 3'' beschaltet sind. Die um die Spulenkerne 1 vorgesehene Spulenanordnungen werden

derart beschaltet, so dass längs der sich parallel nebeneinander befindlichen Flussleitstücke jeweils entgegengesetzt gerichtete HF-Magnetfelder ausbilden, die in Überlagerung mit einem senkrecht zur Werkstückoberfläche orientierten statischen Magnetfeldes, das von einem unipolaren Permanentmagneten 6 herrührt, der die drei Normalprüfköpfe N gesamtheitlich überdeckt, innerhalb des Werkstückes zu jeweils entgegengesetzt gerichteten Wirbelströmen unterhalb unmittelbar benachbarter Flussleitstücke führen, durch die wiederum entgegengesetzt gerichtete Lorentzkkräfte hervorgerufen werden, die letztlich die für die Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen erforderlichen Scherkräfte verantwortlich sind.

Bezugszeichenliste

1	Ringbandkern
2	Stirnfläche
3	Flussleitstück
31, 32	Oberflächen des Flussleitstückes
4	Spulenordnung
41	Sendespule
42	Empfangsspule
5	Elektrische Kontakte
6	Permanentmagnet
7	Werkstück
71	Werkstückoberfläche
8	Wirbelstrom

Patentansprüche

1. Elektromagnetischer Ultraschallwandler zur koppelmittelfreien Erzeugung und/oder zum Empfang von Ultraschallwellen in Form linear polarisierter Transversalwellen in ein bzw. aus einem Werkstück mit wenigstens einer die Ultraschallwellen innerhalb des Werkstückes wandelnden Einheit, die eine Spulenordnung zur Erzeugung bzw. zum Nachweis eines HF-Magnetfeldes sowie eine Vormagnetisierungseinheit zur Erzeugung eines quasistatischen Magnetfeldes aufweist, das das HF-Magnetfeld im Werkstück überlagert, wobei die Spulenordnung torusförmig auf wenigstens einem teilringartig oder U-förmig ausgebildeten Magnetkern angeordnet ist, der jeweils zwei dem Werkstück zukehrbare Stirnflächen aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die dem Werkstück zukehrbaren Stirnflächen des Magnetkerns mittel- oder unmittelbar mit einem die Stirnflächen miteinander verbindenden magnetischen Flussleitstück verbunden sind, das eine dem Werkstück zugewandte Oberfläche aufweist.

2. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach dem Oberbegriff des Anspruches 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens zwei Magnetkerne sowie wenigstens zwei magnetische Flussleitstücke vorgesehen sind, dass die Stirnflächen des einen Magnetkerns jeweils mit einem der beiden magnetischen Flussleitstücke mittel- oder unmittelbar verbunden sind, dass die Stirnflächen des anderen Magnetkerns jeweils mit einem der beiden magnetischen Flussleitstücken beabstandet vom ersten Magnetkern mittel- oder unmittelbar verbunden sind, und dass die magnetischen Flussleitstücke jeweils eine dem Werkstück zugewandte Oberfläche aufweisen.

3. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach Anspruch 2, dadurch **gekennzeichnet**, dass der Magnetkern jeweils U-förmig ausgebildet ist und zwei über einen Verbindungsteil verbundene Längsschenkel aufweist, an deren Enden die Stirnflächen vorgesehen sind, dass zwischen den Längsschenkeln wenigstens ein weiteres Längselement, das einseitig mit dem Verbindungsteil verbunden ist, vorgesehen ist, an dessen Ende eine weitere Stirnfläche vorgesehen ist, und dass wenigstens ein weiteres magnetisches Flussleitstück die Stirnflächen der Längselemente beider Magnetkerne miteinander verbindet.
4. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 oder 2, dadurch **gekennzeichnet**, dass zur Erzeugung von Ultraschallwellen die Spulenanordnung mit einem HF-Generator zur Erzeugung von HF-Magnetfeldern verbunden ist.
5. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 oder 2, dadurch **gekennzeichnet**, dass zum Nachweis von Ultraschallwellen die Spulenanordnung mit einer Verstärkereinheit und/oder einer Auswerteeinheit verbunden ist.
6. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 oder 2, dadurch **gekennzeichnet**, dass die Spulenanordnung zwei getrennte Spulen vorsieht, eine Sendespulenanordnung zur Erzeugung eines HF-Magnetfeldes, die mit einem HF-Generator verbunden ist, sowie eine Empfangsspulenanordnung zum Nachweis eines HF-Magnetfeldes, die mit einer Verstärkereinheit und/oder einer Auswerteeinheit verbunden ist.
7. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch **gekennzeichnet**, dass das magnetische Flussleitstück stabförmig ausgebildet ist und weichmagnetisches Material enthält.

8. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch **gekennzeichnet**, dass das magnetische Flussleitstück aus einer stapelförmigen Anordnung weichmagnetischer Plattenelemente besteht oder aus einem elektrisch nichtleitfähigem Material gefertigt ist, in dem weichmagnetische Partikel matrixförmig verteilt enthalten sind.
9. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch **gekennzeichnet**, dass die Stirnflächen des Magnetkerns fest mit dem magnetischen Flussleitstück verfügt ist.
10. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch **gekennzeichnet**, dass mittel- oder unmittelbar auf einer dem Werkstück abgewandten Oberseite des wenigstens einen magnetischen Flussleitstückes die Vormagnetisierungseinheit vorgesehen ist.
11. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch **gekennzeichnet**, dass die Vormagnetisierungseinheit eine Permanent- oder eine Elektromagnetanordnung ist.
12. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch **gekennzeichnet**, dass die Vormagnetisierungseinheit derart angeordnet ist, dass das quasistatische Magnetfeld senkrecht zur Werkstückoberfläche in das Werkstück einleitbar ist.
13. Elektromagnetischer Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch **gekennzeichnet**, dass die Vormagnetisierungseinheit eine Elektromagnetanordnung ist, durch die ein quasistatisches Magnetfeld horizontal zur Werkstückoberfläche in das Werkstück einleitbar ist.

14. Anordnung zur koppelmittelfreien Erzeugung und/oder zum Empfang von Ultraschallwellen in Form linear polarisierter Transversalwellen in ein bzw. aus einem Werkstück,

dadurch **gekennzeichnet**, dass wenigstens zwei elektromagnetische Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 3 beabstandet derart nebeneinander angeordnet sind, dass die Längsrichtungen der jeweiligen magnetischen Flussleitstücke der einzelnen Ultraschallwandler parallel zueinander ausgerichtet sind.

15. Anordnung nach Anspruch 14,

dadurch **gekennzeichnet**, dass die Vormagnetisierungseinheiten der einzelnen Ultraschallwandler gleichpolig sind, oder

dass sich eine einzige Vormagnetisierungseinheit über alle magnetischen Flussleitstücke der nebeneinander angeordneten Ultraschallwandler erstreckt.

16. Verwendung der Anordnung nach einem der Ansprüche 14 oder 15 zur Erzeugung und/oder Nachweis von horizontal polarisierten Transversalwellen

dadurch **gekennzeichnet**, dass die Spulenanordnungen der wenigstens zwei elektromagnetischen Ultraschallwandler, vorzugsweise eine Vielzahl elektromagnetischer Ultraschallwandler, mittels einer Phased-Array-Ansteuerung betrieben werden.

17. Verwendung nach Anspruch 16,

dadurch **gekennzeichnet**, dass die Spulenanordnungen aller elektromagnetischer Ultraschallwandler nacheinander mit einem in der Phase zeitverzögerten Ansteuersignal derart angesteuert werden, dass im Falle der Erzeugung von Ultraschallwellen die in das Werkstück eintretenden Ultraschallwellen eine von der Phasensteuerung abhängige Richtcharakteristik aufweisen, deren Hauptausbreitungsrichtung bezogen auf die Normale zur Werkstückoberfläche 0° und 90° schwenkbar ist.

18. Verwendung nach Anspruch 16 oder 17,
dadurch **gekennzeichnet**, dass im Wege der Erzeugung von Ultraschallwellen
innerhalb des Werkstückes die Spulenanordnungen der einzelnen Ultraschallwandler
derart angesteuert werden, dass zwei unmittelbar benachbart liegende magnetische
Flussleitstücke jeweils von einem magnetischen Fluss durchsetzt werden, die
zueinander entgegengerichtet orientiert sind.

Zusammenfassung

Beschrieben wird ein elektromagnetischer Ultraschallwandler zur koppelmittelfreien Erzeugung und/ oder zum Empfang von Ultraschallwellen in Form linear polarisierter Transversalwellen in ein bzw. aus einem Werkstück mit wenigstens einer die Ultraschallwellen innerhalb des Werkstückes wandelnden Einheit, die eine Spulenordnung zur Erzeugung bzw. zum Nachweis eines HF-Magnetfeldes sowie eine Vormagnetisierungseinheit zur Erzeugung eines quasistatischen Magnetfeldes aufweist, das das HF-Magnetfeld im Werkstück überlagert, wobei die Spulenordnung torusförmig auf wenigstens einem teilringartig oder U-förmig ausgebildeten Magnetkern angeordnet ist, der jeweils zwei dem Werkstück zukehrbare Stirnflächen aufweist.

Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass die dem Werkstück zukehrbaren Stirnflächen des Magnetkerns mittel- oder unmittelbar mit einem die Stirnflächen miteinander verbindenden magnetischen Flussleitstück verbunden sind, das eine dem Werkstück zugewandte Oberfläche aufweist.

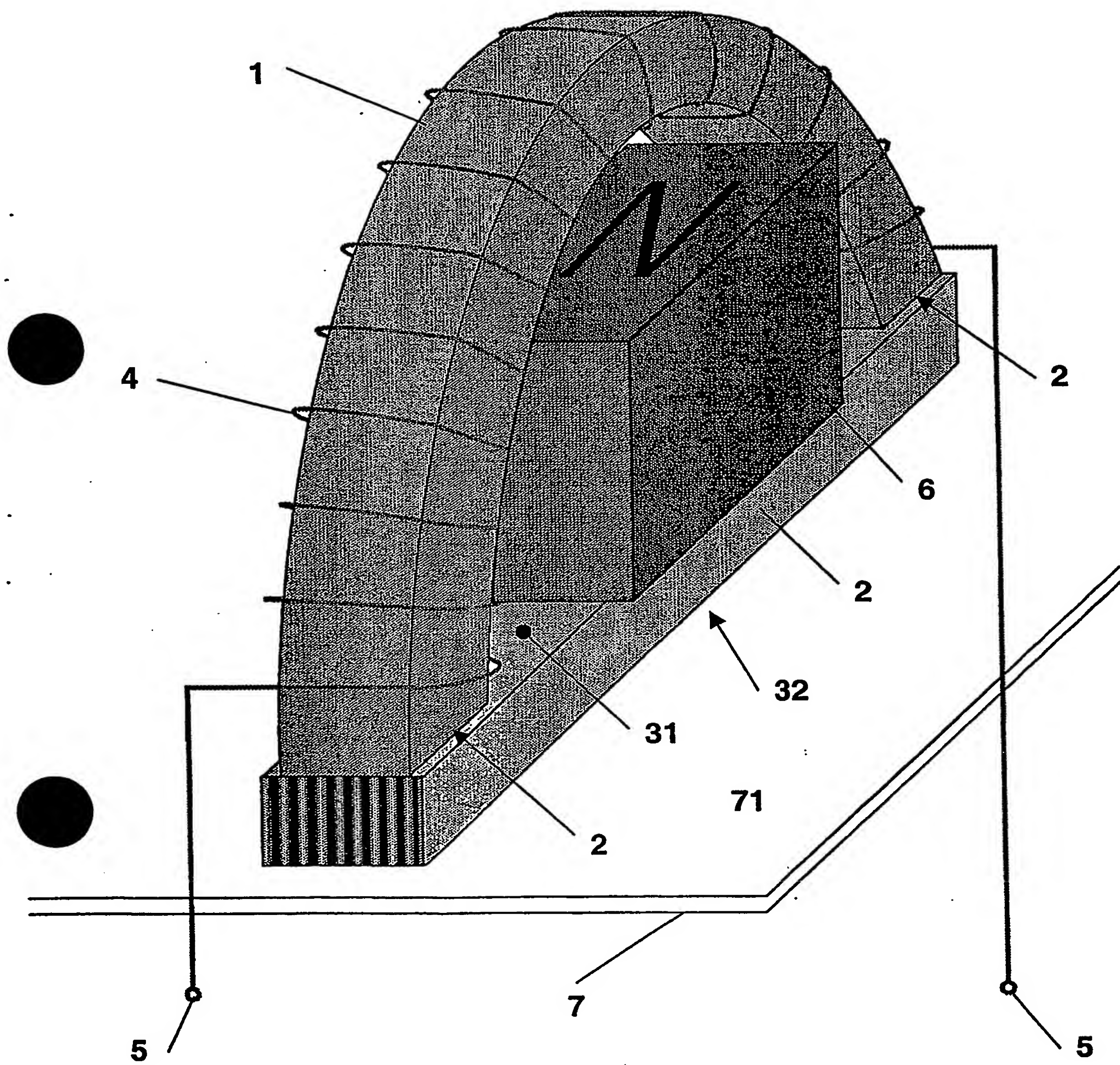


Fig. 1

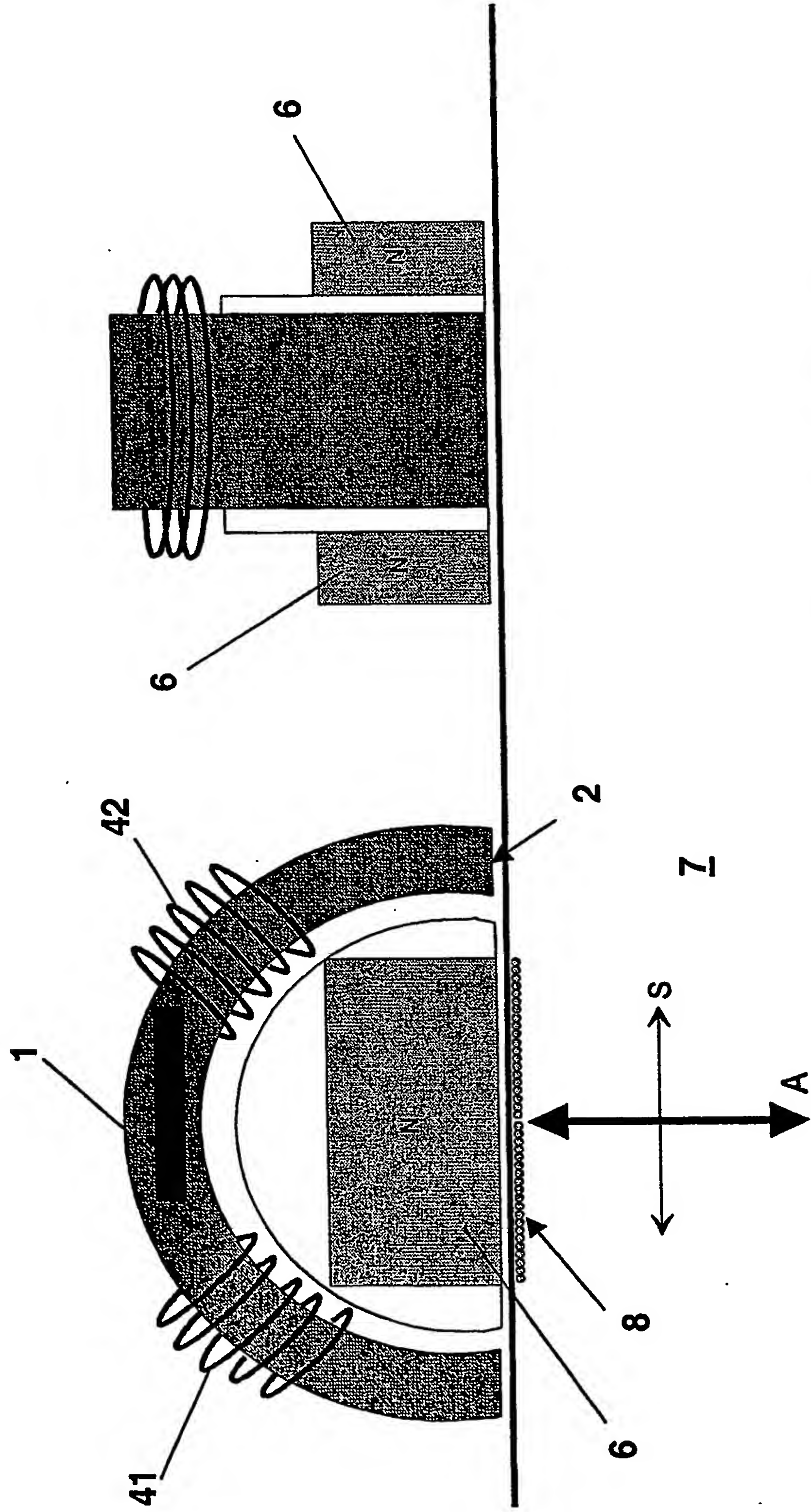


Fig. 2 (Stand der Technik)

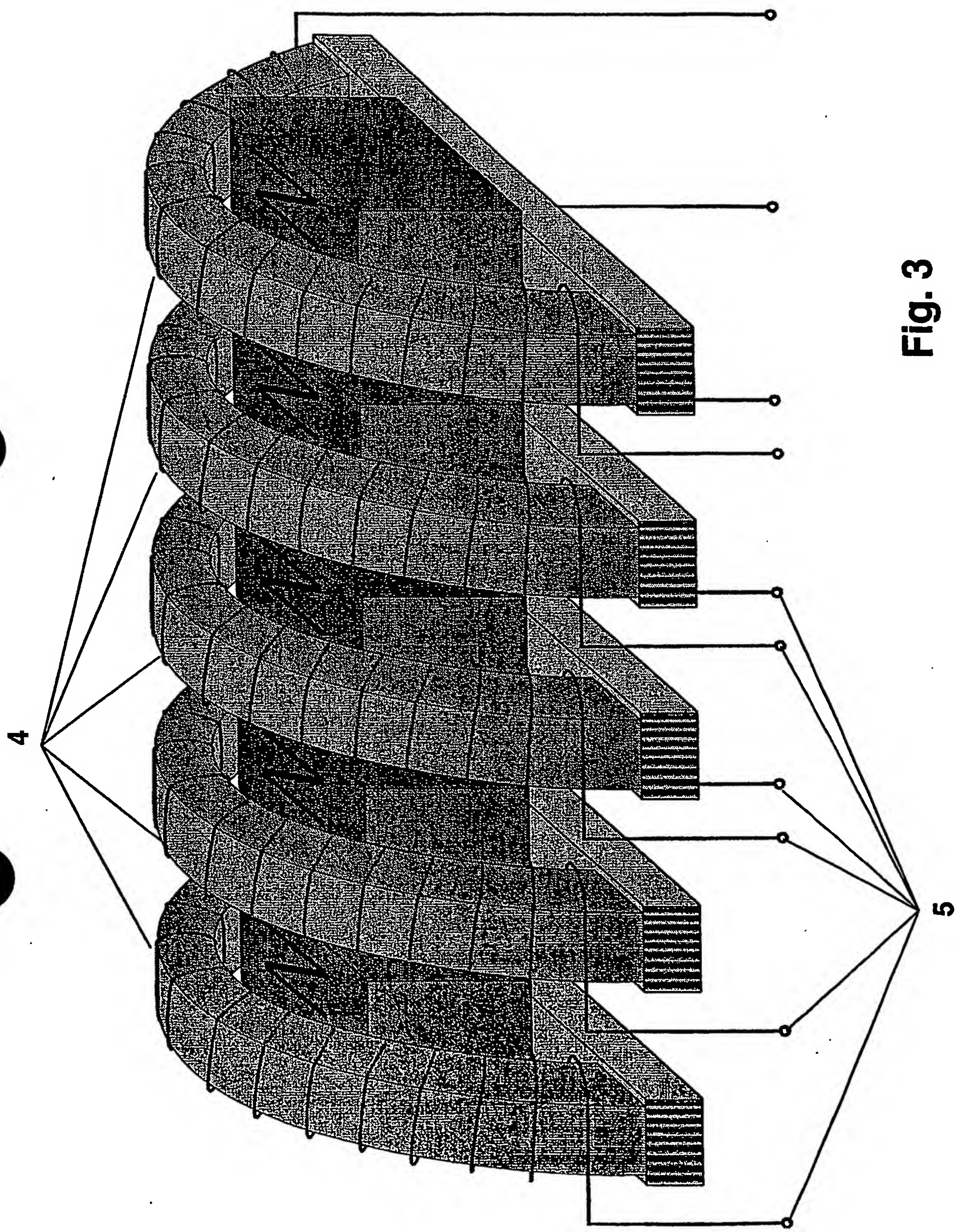


Fig. 3

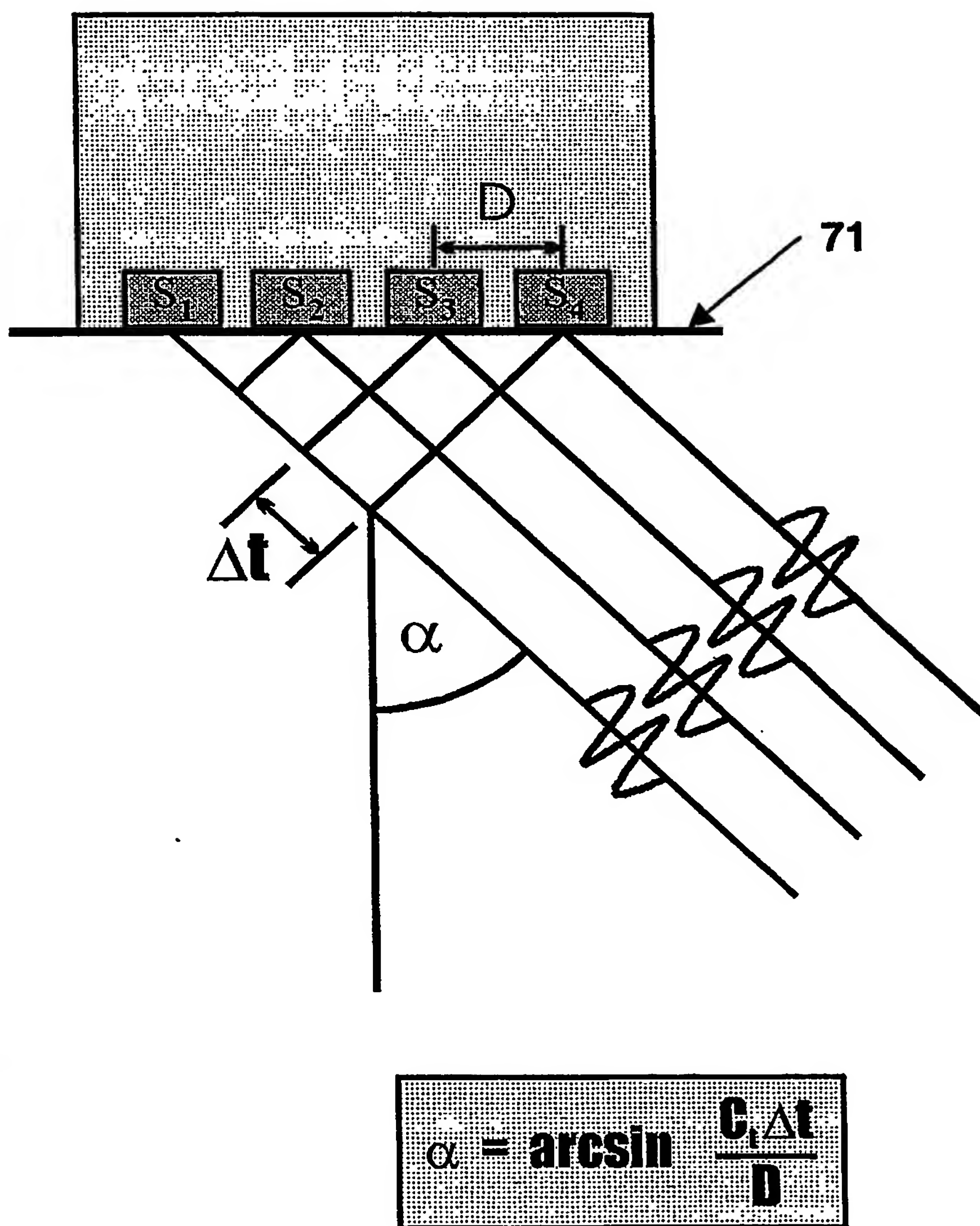


Fig. 4

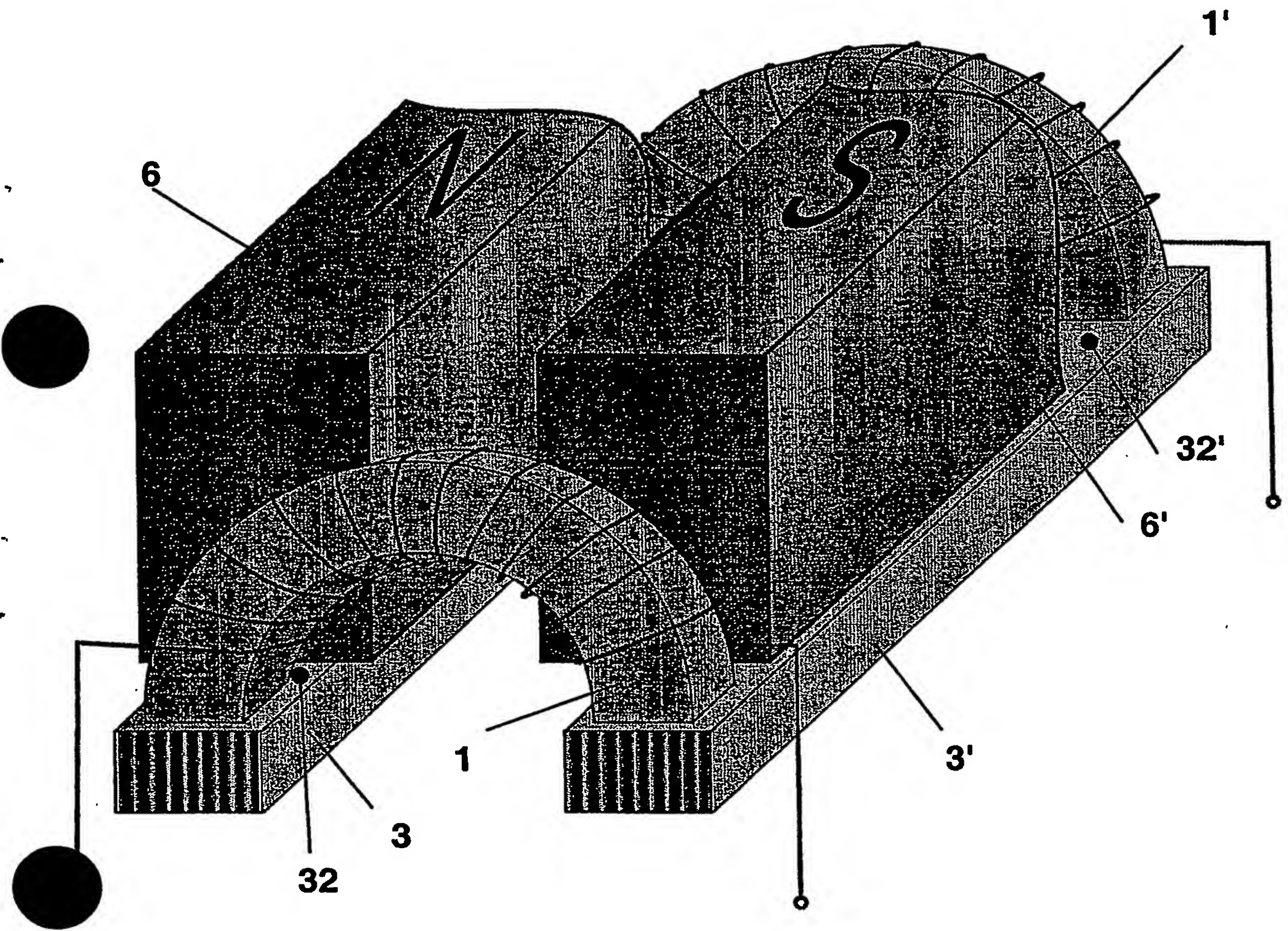


Fig. 5

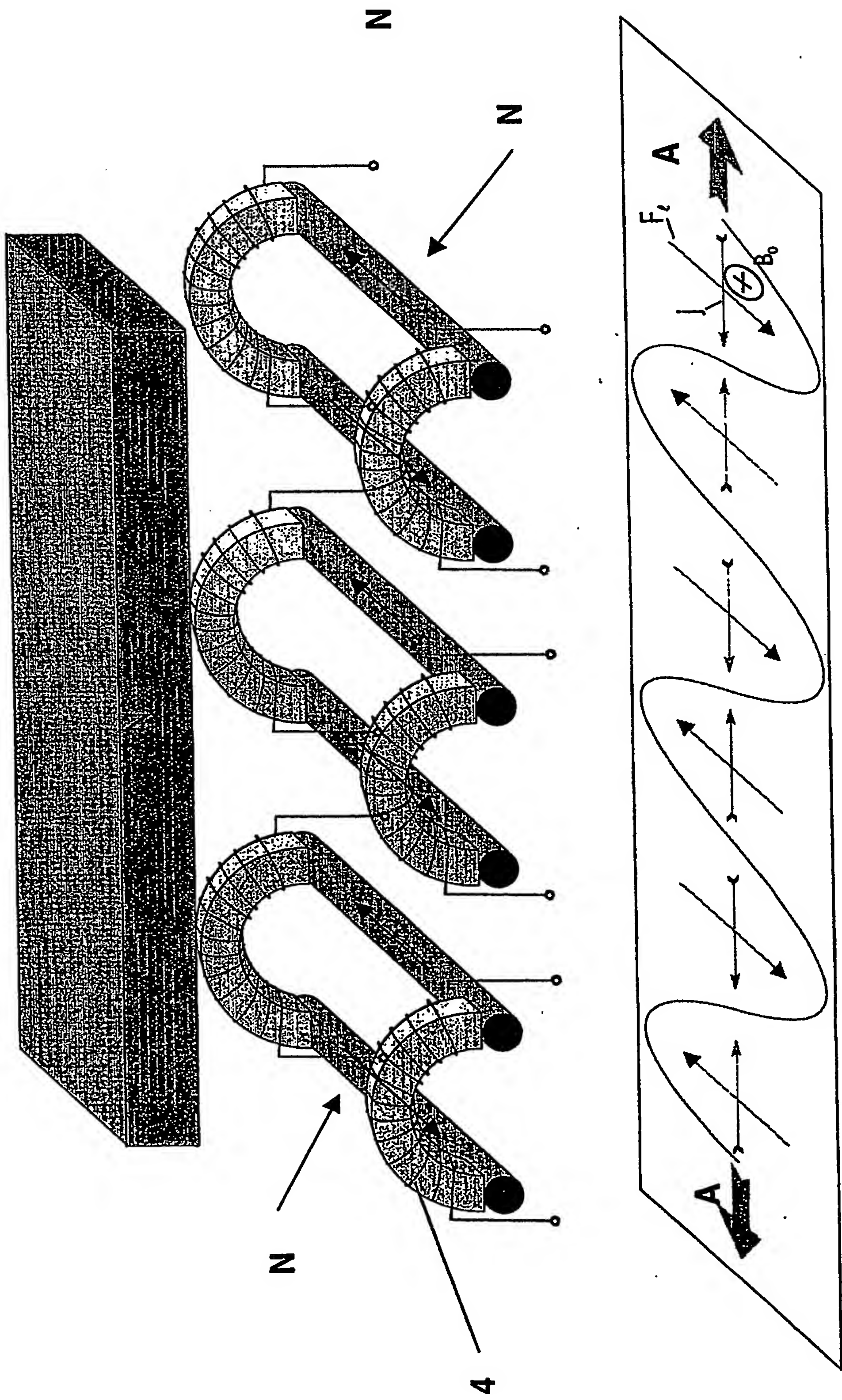


Fig. 6

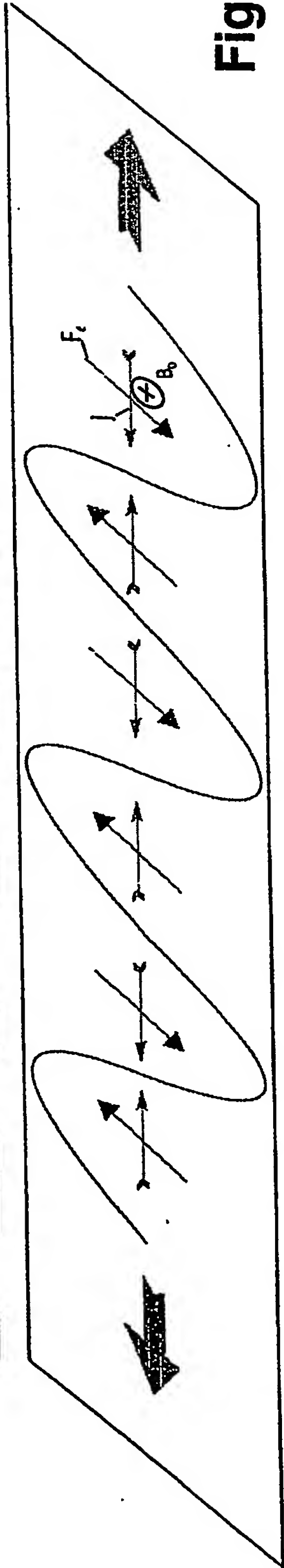
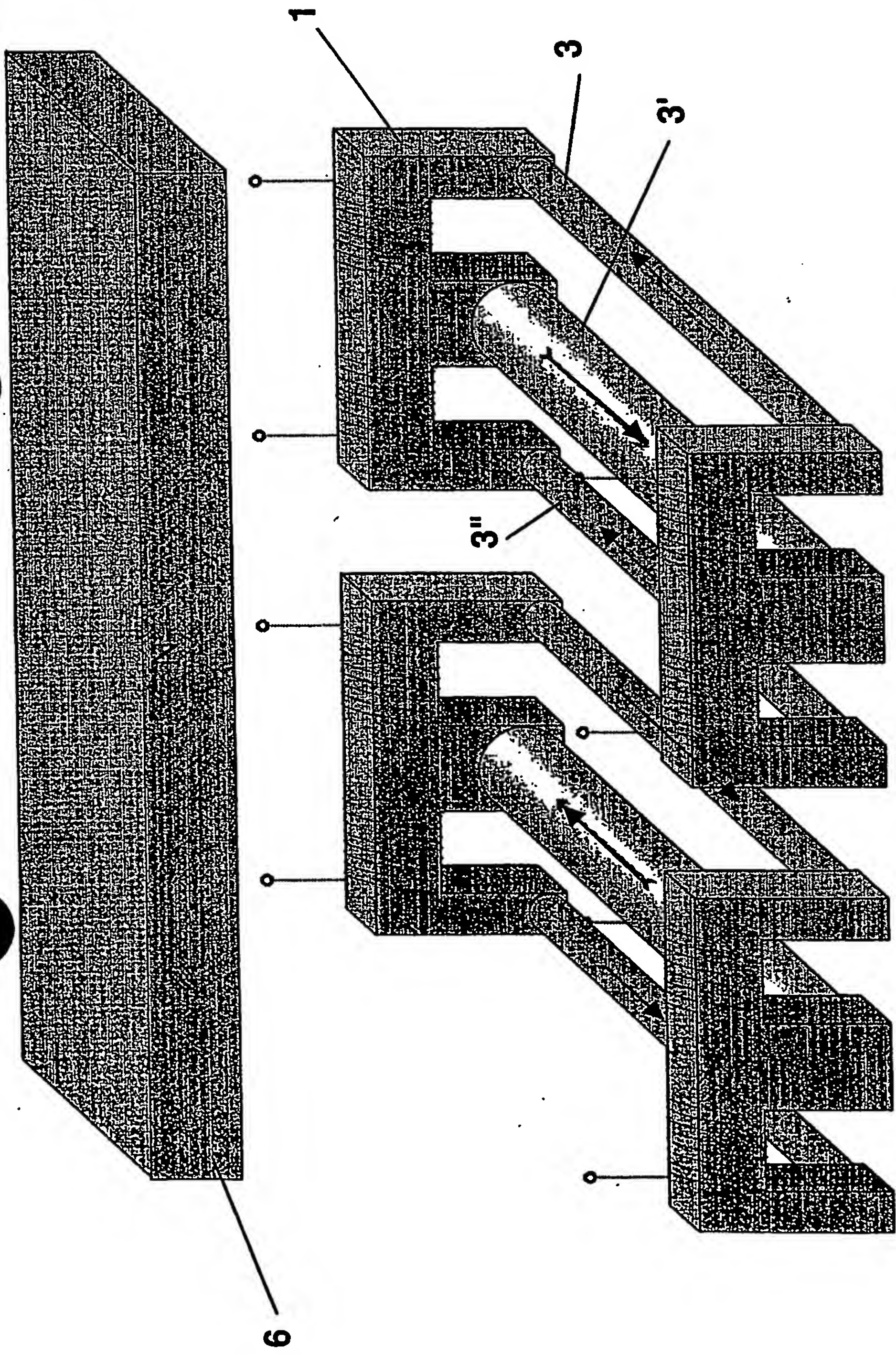


Fig. 7

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.